

B-52轰炸机换发回顾

Review of B-52 Bomber Re-Engining Program

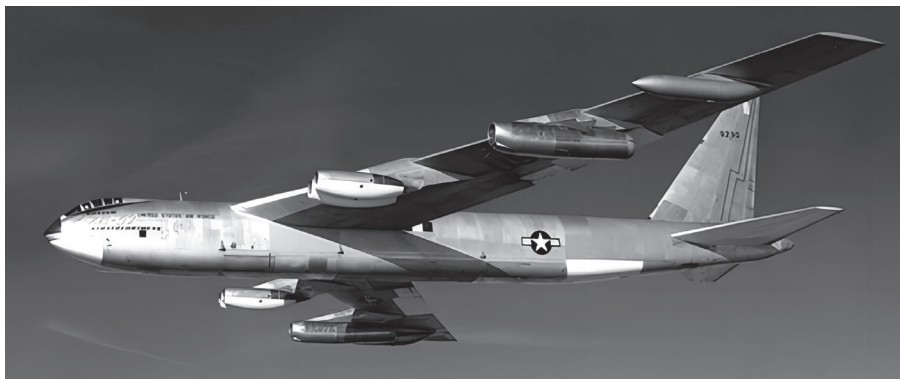
■ 王翔宇 刘金超 秦亚欣 / 中国航空发动机研究院

B-52轰炸机换发是美国空军全球空中打击力量调整与发展过程中的一件大事，其中既涉及早期八发变四发所产生的飞发一体化争论，也包括后期一换一方案确定后多种商用航空发动机军用改型之间的激烈竞争。

过去的60多年里，B-52轰炸机一直是美国空军战略轰炸部队的支柱装备，为美国提供全球全天候核打击和常规打击能力。随着B-1B轰炸机和B-2A轰炸机逐渐退役，未来一个时期美国空军将形成B-21轰炸机和B-52轰炸机新老搭配的作战力量，B-52轰炸机会继续作为美国国家安全战略的重要组成部分服役到2050年左右。相应地，B-52轰炸机需要不断进行技术升级从而保持高水平作战效能，而发动机的更新换代是其中至为关键的一部分。就在美国空军第一次认真考虑B-52轰炸机换发事项的40年后，2021年9月，B-52轰炸机商用发动机更换计划（CERP）合同最终花落罗罗公司，BR725发动机将一对一替换掉TF33发动机为B-52轰炸机提供动力，这也是B-52轰炸机有史以来最大程度的一次改装。

B-52轰炸机换发历程

波音公司研制的第一架生产型B-52A轰炸机于1954年8月首飞，1955年第一架批产型B-52B轰炸机交付使用，配装8台普惠公司的J57涡喷发动机，两侧机翼下分别吊装2组发动机，每组2台。但B-52轰炸机服役之初就面临动力不足的问题，即便是在起飞阶段可通过喷水的方式提高推力，



配装 J75 发动机的 B-52 轰炸机进行飞行测试

但在高温环境下满载飞行时发动机的综合性能表现也很差，而喷水后燃料不充分燃烧所产生的滚滚黑烟更是成为了人们对B-52轰炸机挥之不去的印象。1956年年初，美国空军曾尝试探索用1台GE公司的J75加力涡扇发动机替换掉机翼外侧挂架上1组J57发动机（即八发变六发）的可行性，尽管超过140h的飞行试验显示B-52轰炸机的性能有了实质性的提高，但这种2型不同的发动机同时为飞机提供动力的“混合”配置方案并没有被真正采用，在B-52H轰炸机之前各个子型号全部由J57系列发动机提供动力。

当最后1架B-52H轰炸机于1962年10月完成交付时，这些H系列均换装了普惠公司的TF33涡扇发动机。该型发动机是1959年通过改进J57发动机的低压系统（去掉前3级低压压

气机，换成2级大尺寸风扇，将第2级低压涡轮加大，并增加第3级低压涡轮），在很短时间内研制成功并投入使用的。与J57发动机相比，TF33发动机的性能有了跨时代的提升，起飞流量增加了2.5倍、起飞推力提高了50%、巡航推力增加了27%、巡航油耗减少了13%，噪声水平显著降低。除了B-52H轰炸机以外，TF33发动机还在KC-135加油机、E-3和E-8预警机、C-135和C-141运输机等多个飞行平台得到广泛应用。事实上在1994年B-52G轰炸机完全退役后，TF33发动机已成为美国空军现有B-52机队的唯一动力装置。

TF33发动机投入使用10余年后，美国空军和波音公司再次进行了B-52换发的论证，要么在4个机翼挂架上全部安装单台新发动机，要么在机翼内侧的2个挂架上安装一对新发

动机。在此基础上，1980年前后普惠公司对用4台配装波音757飞机的PW2000发动机替换8台TF33发动机进行了详细设计方案研究，但当时由于预计到20世纪90年代中期B-52轰炸机机队将被B-1B和B-2A轰炸机完全取代，这些工作并未受到足够的重视。1996年，1架B-52轰炸机在飞行中发生双发脱落事故后，波音公司又提议和罗罗公司合作，以租赁的方式使用RB211-535发动机对TF33发动机一换二，该发动机还是波音757飞机的动力选项，但美国空军并不同意这种不符合“供应链本土自主可控”的换发模式。

可以说在B-52轰炸机服役的前30余年里，围绕其换发的讨论主要集中在能否用1台推力相同或更大的发动机来替换原来的2台发动机，这可能会减少25%以上的燃料消耗。单纯从发动机的角度看确实有很多产品可供选择，但从飞发一体化的角度看情况可能要复杂很多，绝不是仅仅更换短舱和挂架这么简单。例如，为了增加B-52轰炸机的低空突防能力、避免低空高速飞行时的颤振，B-52轰炸机在系列化发展过程中尾翼高度不断缩小，静态方向稳定性大大低于最初的设计，同时方向舵弦长偏短，能够提供的偏航力矩有限，八发变四发后在起飞着陆或其他侧风条件下，一旦出现单发失效（单侧推力损失从25%上升到50%），飞机姿态可能完全无法控制，尾翼和方向舵系统必须要重新设计以匹配新的大推力发动机。事实上除了尾翼部分以外，B-52轰炸机的机翼部分可能也需要调整，从而确保换发后下挂弹药能够安全投放。

更换B-52轰炸机的发动机似乎并不是一个高技术风险项目，但显然低技术风险与低投入成本并无必然联系。从2台小推力发动机到单台大推力发动机不仅改变了动力输出特性、发动机布局以及相应的短舱设计，也对B-52轰炸机飞行力学表现产生了不可忽视的影响，为了解决机翼和尾翼颤振、静稳定性不足和武器投放包线范围缩小等一系列问题，所附加的资金与时间成本将大大消减降低燃料消耗产生的收益。从20世纪90年代后期开始，美国军方和航空业界关于B-52轰炸机八发变四发的呼声逐渐减弱，但有一点共识就是想要延长B-52轰炸机的使用寿命，就要更换其动力系统，而重新设计新的专用航空发动机是不现实的，只有像之前那样，通过对成熟商用航空发动机改型能够在尽可能少投资的同时提升B-52轰炸机的综合动力性能。

B-52轰炸机换发竞争

在B-52轰炸机前期换发博弈中，TF33发动机及其众多的竞争对手均属于推重比为5左右的第二代航空动力系统，除了推力量级相差较大外，其他性能指标并没有不可逾越的代差，燃油效率的改进更多通过减少发动机数量体现。但随着TF33发动机于1985年停产，新技术、新产品的不断涌现，情况出现了很大的变化。

一是与TF33发动机同等推力量级的新发动机燃油效率提升了10%~20%，在役寿命从2000h以下上升到了10000h以上，年利用率约为TF33发动机的6倍；二是停产后TF33发动机的维护成本急剧上涨，单台发动机返厂大修成本从1996年的24.7万美元

上涨到了2006年的125万美元，远超之前预期的2%年化增速；三是由于不符合排放法规要求，TF33发动机的民用型号JT3D发动机在21世纪初就逐步退出了市场，从社会责任角度出发，B-52轰炸机也承受着越来越大的环保压力；四是除B-52H轰炸机外，其余所有配装TF33发动机的飞行平台都是波音707飞机的改型，而这些机型的换发行动也都在进行中。作为一个整体考虑，已经没有必要再保有TF33发动机的维护能力了，将其完全剥离出装备库的时机已经成熟。

尽管理由看起来是如此的充分，但由于B-52轰炸机未来的产品定位始终未能明确，相应的换发日程被一拖再拖。根据美国空军最终的研究结论，结合任务能力率和单位飞行小时成本等因素考量，B-1B轰炸机和B-2A轰炸机这两型比B-52轰炸机晚问世20余年的装备将更早退役，B-52H轰炸机继续服役30年所进行的能力升级将节省超过100亿美元的燃料使用和机队维护费用。2020年，美国空军正式发出了B-52轰炸机商用发动机换装招标文件，每架B-52H轰炸机上的8台TF33发动机将由8台燃油效率和可靠性更高的新发动机一换一，即为降低成本和技术风险彻底排除了对发动机配置进行重大改变的可能性，从而最大限度与B-52H轰炸机兼容。考虑到新发动机应与TF33发动机的推力量级、质量和几何尺寸这3个“硬指标”保持一致，候选机型只能是公务机或支线飞机动力系统的改型。普惠公司、GE公司和罗罗公司三大航空动力制造商对此表现得格外积极，纷纷拿出各自的方案参与竞争。

B-52轰炸机原装发动机与商用发动机换发主要竞品参数比较

动力型号	TF33	PW800	CF34-10	Passport	BR725
制造商	普惠公司	普惠公司	GE公司	GE公司	罗罗公司
最大推力/kN	75.56	80	90.55	84.06	75.6
质量/kg	2109	1447	1705	1791	1632
长度/m	3.6	3.314	2.286	2.61	3.41
风扇直径/m	1.372	1.27	1.346	1.321	1.27

作为长期以来B-52轰炸机唯一的发动机供应商，普惠公司推出了其最新一代的公务机发动机PW800。该发动机于2015年年初完成适航取证，与TF33发动机相比，燃油效率提升了30%以上，并可使每架B-52轰炸机减轻近2500kg的质量。普惠公司还在宣传材料中特别强调PW800发动机已战胜了罗罗公司和GE公司的同类产品，为湾流G500、G600和巴航工业E2等飞行平台提供动力。

GE公司的方案则包括了“通行证”（Passport）和CF34-10这一新一老两种发动机选项。前者是GE公司对标PW800的新型发动机，创下了公务机不间断飞行最长距离的纪录，展现了极佳的燃油效率和可靠性；后者则是GE公司最久经考验的动力产品，累计飞行时间1.6亿h，首次大修平均周期为16000飞行循环，若换装CF34-10发动机，在B-52轰炸机未来的服役周期内动力系统只需进行在翼维护即可。

罗罗公司的BR725（军用型号F130）发动机同样是一款具有成熟设计和生产经验的产品。该发动机是BR700系列的最新成员，2009年通过适航认证，截至2019年已配装超过300架湾流G650系列公务机。事实上，美国空军目前有数十架C-37A/B运输机（湾流G500、G550的军用改型）以及3架搭载战场机载

通信节点（BACN）系统的E-11A飞机均由BR725发动机提供动力。

整体来看，无论是PW800发动机和Passport发动机，还是CF34-10发动机和BR725发动机，均能够满足此次B-52轰炸机的换发要求。不过对于PW800发动机和Passport发动机这两款尚处于成长期的产品来说，其综合性能较TF33发动机几乎实现了两代的跨越，如此先进的动力系统能否匹配老旧的飞行平台存在很多未知，不仅相关的数字化控制系统、预测性健康管理系统等可能很难在B-52轰炸机上真正发挥作用，而且也带来了更大的发动机采购和改装成本。此外，由于其投入使用的的时间过短（分别为2018年和2016年），实际使用到底效果如何有待市场的进一步检验。以PW800发动机为例，其在换发竞标时的飞行时间还不到15万h，仅相当于CF34系列发动机的0.1%、CF34-10发动机的0.5%。

CF34-10发动机和BR725发动机基本属于同一代的产品。如果B-52轰炸机换发竞争早10年，CF34-10发动机以其优异的历史表现几乎不存在像样的竞争对手，但时至2020年，CF34-10发动机已经从“成熟期”进入“夕阳期”，有分析认为其生产线可能会在2030年前关闭，这对于B-52轰炸机的后续使用不可避免会产生影响。而BR700系列发动机的核

心机研发要比CF34系列发动机的前身TF34发动机晚近20年，长期来看配套供应链更稳定，在功率提取等方面的升级扩展也更有潜力。更为关键的是，BR725发动机已经配装了美国空军现役机队，可共用相关的仓储、维护与检修资源，有效避免额外的支出，而CF34-10发动机虽然在各类公务机和支线飞机上得到极为广泛的应用，但一直未纳入美国空军的装备库。

经过近3年的竞争博弈，罗罗公司获得了价值5.009亿美元的合同以在B-52轰炸机上开发和测试F130发动机（基于BR725发动机的改型），若进展顺利，后续的合同将达到26亿美元，为全部在役76架B-52H轰炸机提供650台发动机（含备发），换装后的B-52H轰炸机将被命名为B-52J。为满足美国政府和军方的国产化要求，相关研发生产主要由罗罗北美公司在美国印第安纳州新建的基地进行。2023年3月，罗罗公司在美国国家航空航天局（NASA）斯坦尼斯航天中心启动了2台F130发动机的露天测试，这也是F130发动机首次在B-52轰炸机的双短舱上进行测试，测试过程贯穿2023年全年。罗罗公司计划在2024年为首批2架B-52H轰炸机改装F130发动机，并在2025年进行新发动机测试。此前，波音公司已开展了4%比例的B-52J轰炸机风洞试验以确定换装F130发动机后短舱的改装方案。

几点思考 飞发一体化综合考量

从历史的发展来看，飞机机体效率的进步要比动力系统慢得多。通过对现有飞行平台换发的方式来降低研发成本、提升综合效能、延



波音公司对换装F130发动机后的B-52轰炸机进行风洞测试

长服役周期已经在军用和民用市场得到了广泛的实践。但飞机和发动机都属于极为复杂的大系统，任何一个部件或系统的修改往往牵一发而动全身，哪怕是微小的改动也很可能会引来巨大的响应。从物理尺寸和质量、起飞和巡航时的推力，以及净安装阻力，到短舱和挂架的改装以及飞机和发动机的各种接口细节，再到发动机运行中和失效时飞机飞行力学特性的变化，也许未来不会再发生像B-52轰炸机八发换四发这样历时长久的大讨论，但对新旧发动机性能规格差异所产生一系列影响必须要有全面的认识。例如，波音737MAX8飞机换装风扇直径过大的LEAP-1B发动机，经过种种手段“修形”后，短舱离地高度过低、俯仰稳定性变差，从而导致了一系列事故就是非常深刻的教训。

商用航空发动机军用改型

除了B-52轰炸机换发过程中论证的各型商用航空发动机外，无论是普惠公司的PW2000发动机（军用型号F117）配装C-17运输机、PW4062发动机配装KC-46加油机、V2500发动机配装C-390运输机，还

是GE公司的CF6-80C2发动机（军用型号F138）配装C-5M运输机、CFM56-2发动机（军用型号F108）配装KC-135R加油机，航空业界在商用航空发动机军用改型上积累了充足的案例。一方面，涉及超声速高机动性、高隐身性和推力矢量控制的战斗机动力确实具有较强的特异性，用于亚声速飞行的航空发动机则很大程度上是产品军民相通、技术军民共享的，先进民用航空发动机已成为轰炸机、运输机、加油机乃至高空长航时无人机的一个重要动力选项；另一方面，换装商用航空发动机后，任何飞行性能的提升都只是发动机效率提升的副产品，这意味着候选的商用航空发动机既不会太老也不会太新，前者带来的效率收益有限，也存在较大的供应链稳定性风险，而后者所附带的种种性能提升并不是换发的核心关注点。

航空发动机的同质化竞争

所谓的同质化并不是指各个航空发动机制造商发展的技术路径完全一致，而是相关产品作为一个“黑盒子”，能够给飞行平台提供的综合动力支持水平并没有本质的高低

差异。随着航空发动机系列化发展进程加快，各个制造商纷纷以先进核心机为基础，匹配不同的低压部件，发展出适应不同飞机的、覆盖一定推力/功率范围的多型不同发动机，事实上B-52轰炸机换发竞标中的PW800和Passport发动机就是PW1000G和LEAP发动机的缩放版，二者的博弈已经从窄体机市场延伸到了支线飞机和公务机市场，甚至又发展到了军用市场。这些发动机单纯从技术指标和采办成本方面看已经很难评价孰优孰劣，特别在新发动机普遍缺少市场检验的情况下，飞机的换发或选发还要对动力产品以外的因素进行统筹权衡。例如，该发动机项目对一个地方的经济发展和人员就业有多大的带动作用；其配套供应链国产化保障程度有多高；能否进一步巩固加强国家的整体航空工业基础。

结束语

为了尽可能降低技术风险并最大限度节约成本，B-52轰炸机换发选择了一对一的商用航空发动机替换思路，罗罗公司推出的BR725发动机以成熟而不老旧、在美国空军中有部署经验的优势胜出，这有望为B-52轰炸机带来30%左右的燃油效率提升，以及更强的电力支持能力和更高的可靠性保障。在B-52轰炸机朝着服役百年目标前行的过程中，换发所伴随的飞发一体化综合考量、商用航空发动机军用改型发展以及航空发动机的同质化竞争等问题值得关注与思考。

航空动力

（王翔宇，中国航空发动机研究院，高级工程师，主要从事航空发动机发展战略研究）